

Validez y fiabilidad del sensor láser del sistema BioLaserSport® para el análisis de la velocidad de la carrera

Validity and reliability of the laser sensor of BioLaserSport® system for the analysis of the running velocity

Amelia Ferro

Universidad Politécnica de Madrid

Pablo Floría

Universidad Pablo de Olavide de Sevilla

Jorge Villacieros

Universidad Politécnica de Madrid

Raquel Aguado-Gómez

Universidad Autónoma de Madrid

Resumen

El análisis de la velocidad de carrera mediante sensores láser permite la obtención de datos en tiempo real siendo ventajosos frente a otros sistemas. El objetivo de este estudio fue valorar la validez y fiabilidad del sensor láser del sistema BioLaserSport® para el cálculo de velocidades medias y máximas mediante estadísticos relativos y absolutos. Los participantes fueron 17 varones (20.85 \pm 1.54 años). Se utilizó un sensor láser tipo 1 (LDM301, Jenoptik, Germany) que registró posiciones de los deportistas a 2000 Hz. Los datos se trataron con la rutina DSL-30 creada con DasyLab v.10.0. Para la validación se utilizó un sistema de fotogrametría-2D con una cámara de alta velocidad (Exilim High Speed EX-F1, Casio) y SkillSpector v.1.3.2. (Video4coach, Grubbemollevej). Además, se utilizaron foto-células de doble haz (Polifemo Light, Microgate, Italy) y un cronómetro Racetime2 (Microgate, Italy). Se registraron, durante dos días, tres series de 30 m de carrera a máxima velocidad. El sensor láser proporcionó, con relación a la fotogrametría, diferencias en las velocidades medias y máximas de -0.11 m•s⁻¹ y 0.14 m•s⁻¹, respectivamente, con unos coeficientes de correlación superiores a 0.86, y mayores de 0.92 con las foto-células para las velocidades medias. Este mostró una excelente fiabilidad test-retest para las velocidades medias con un coeficiente de correlación intraclase (ICC) entre 0.7-0.9 y un error estándar de la media (SEM y SEM%), intrasesión e intersección, menor de 0.05 m•s⁻¹ y 0.12 m•s⁻¹, respectivamente, y menores de 0.75% y de 2%, respectivamente. Para las velocidades máximas, los valores fueron menores de 0.10 m•s⁻¹ y 0.17 m•s⁻¹, respectivamente, y en ambos casos menores a 1.36% y 1,89%. El láser fue capaz de identificar mínimos cambios detectables (MDC y MDC%) intrasesión, para ambas variables, menores a 0.14 m•s⁻¹ y 0.29 m•s⁻¹, respectivamente (< 2.09% y < 3.76%) e intersesión, menores de 0.34 m•s⁻¹ y 0.47 m•s⁻¹ (< 5.56% y < 5.25%), respectivamente. En consecuencia, es un instrumento útil para el análisis de la evolución de la velocidad intrasujeto y entre sujetos en la carrera de velocidad entre 0-30 m, proporcionando resultados en tiempo real, pero se han de considerar los SEM, SEM%, MDC y MDC% para valorar la mejora del rendimiento.

Palabras clave: carrera de velocidad; rendimiento; mínimo cambio detectable; error estándar de la media; fotogrametría; cronometraje foto-células

Abstract

Speed running analysis using laser sensors allows to obtain data in real-time showing an advantage compared with other systems. The objective of this study was to assess the validity and reliability of the laser sensor of the BioLaserSport® system for the calculation of mean and maximum velocities using relative and absolute statistics tools. The participants were 17 men (20.85 \pm 1.54 years). A laser sensor type 1 (LDM301, Jenoptik, Germany) was used to record positions of the subjects to 2000 Hz. The data were analyzed using DSL-30 routine created with DasyLab v.10.0. A Photogrammetry-2D system with a high-speed camera (Exilim High Speed EX-F1, Casio) and SkillSpector v.1.3.2. (Video4coach, Grubbemollevej) and a reference system 4 x 2 m2 was used. Furthermore, a double photocell (Polifemo Light, Microgate, Italy) with an electronic stopwatch (Microgate, Italy) Racetime2 was used. Three series of 30 m sprint were recorded during two days. The results indicated that the laser sensor provided differences in mean and maximum velocities of -0.11 m•s⁻¹ and 0.14 m•s⁻¹, respectively. The correlation coefficients were higher than 0.86 in relation to photogrammetry and higher than 0.92 in relation to photo-cells. The laser system showed an excellent test-retest reliability for mean velocities with a coefficient of correlation intraclass (ICC) between 0.7-0.9. The standard error of the mean (SEM and SEM%), intra-session e inter-session, were lower than, 0.05 m•s⁻¹ and 0.12 m•s⁻¹, respectively, and in both cases less than 0.75% and 2%, respectively. In relation to maximum velocities, the values were lower than 0.10 m•s⁻¹ and 0.17 m•s⁻¹, respectively, and in both cases less than 1.36% and 1,89%. The minimum detectable change (MDC and MDC%) intra-session, for both variables, was lower than 0.14 m•s⁻¹ and 0.29 m•s⁻¹, respectively, (< 2.09% y < 3.76%). In relation to inter-session, the values were lower than 0.34 m•s⁻¹ and 0.47 m•s⁻¹ (< 5.56% y < 5.25%), respectively. Therefore, the laser system was a useful tool to analyze the evolution of the intra-subject and inter-subject velocity in a 30 m sprint running. Moreover, it provides results in real time, although assessing performance improvements must be considered the SEM, SEM%, MDC and MDC% values.

Key words: sprint running; performance; minimum detectable change; standard error of the mean; photogrammetry; stopwatch photo-cells.

Correspondencia/correspondence: Amelia Ferro
Universidad Politécnica de Madrid. España
E-mail: amelia.ferro@upm.es

Introducción

El análisis de la velocidad de carrera en el deporte de competición resulta fundamental para la mejora del rendimiento. La cualidad de la velocidad es específica de cada deporte y especialidad (Harrison, Jensen, y Donoghue, 2005). En los entrenamientos es muy habitual el uso de células fotoeléctricas por parte de técnicos deportivos (Yeadon, Kato, y Kerwin, 1999), aunque la fotogrametría ha sido la técnica más utilizada entre los biomecánicos (Ferro, Rivera, Pagola, Ferreruela, y Rocandio, 2001; Floría y Ferro, 2011; Graubner y Nixdorf, 2011; Locatelli y Arsac, 1995). Debido a su importancia, se han propuesto en la bibliografía varios sistemas para obtener la velocidad en carrera. Desde 1927, en que Hill usó una serie de bobinas junto con un imán transportado por el propio corredor para determinar su velocidad (Hill, 1928) hasta la actualidad, se han usado diferentes sistemas que pretenden mejorar la precisión, la fiabilidad y la inmediatez en la salida de los resultados. Recientemente han aparecido los radares (Di Prampero, Fusi, Sepulcri, Morin, Belli, y Antonutto., 2005), los sistemas de posición global (GPS) (Coutts y Duffield, 2010) y la tecnología láser (Adamezewski y Perl, 1997; Brüggemann, Koszewski, y Müller, 1999; Dickwatch, Hildebrand, y Perl, 1994).

De los anteriores sistemas, posiblemente las células fotoeléctricas sean las más utilizadas por entrenadores y deportistas debido a la facilidad de uso e inmediatez de resultados. Con este sistema se mide el tiempo empleado en recorrer una distancia determinada y a partir del cual se calcula la velocidad media. Aunque se trata de una tecnología que proporciona datos inmediatos, ésta no es capaz de proporcionar datos continuos de la evolución de la velocidad durante la prueba. Para obtener una medida continua se ha utilizado la fotogrametría. Sin embargo, es necesario recordar que se trata de un sistema de medida indirecto, que precisa de un complejo y laborioso proceso de digitalización y de unas técnicas de filtrado y/o suavizado excesivamente abiertas e intuitivas. Asimismo, la obtención de resultados no es inmediata cuando se trabaja en ciertas condiciones de entorno. Una forma de agilizar el proceso es digitalizar un único marcador, aceptando éste como una representación de la posición del cuerpo completo. Esta metodología ha sido utilizada en el análisis de las pruebas velocidad de atletismo tanto en Campeonatos del Mundo (Brüggemann y col., 1999; Ferro y col., 2001; Graubner y Nixdorf, 2011; Landry, 1987; Moravec, Ruzicka, Susanka, Dostal, Kodejs, y Nosek., 1988) como en Juegos Olímpicos (Brüggemann y Glad, 1990; Susanka, Moravec, Dostal, Ruzicka, Barac, Vezlak, Nosek, y Jardik, 1989).

Con el doble objetivo de obtener datos de velocidad inmediatos y continuos, en los últimos años han aparecido nuevas tecnologías como el radar, el GPS o el láser. De entre ellas destaca el láser por su elevada frecuencia de registro, hasta 2000 Hz, frente a los 32 Hz del radar (Young, Farrow, Pyne, McGregor, y Handke, 2011) o los 10 Hz del GPS (Varley, Fairweather, y Aughey, 2012). La tecnología láser ha sido utilizada, tanto en pruebas en donde el principal objetivo sea recorrer una distancia en el menor tiempo posible (Brüggemann y cols., 1999), como aquellas en las que la fase de carrera sea importante para lograr un buen resultado, como por ejemplo los saltos (Adamezewski y Perl, 1997; Dickwatch y col., 1994). La posibilidad de medición sin el uso de un reflector y en tiempo real ha posibilitado que el sistema de medición de láser haya sido probado tanto en condiciones de competición (Adamezewski y Perl, 1997; Brüggemann y Glad, 1990; Dickwatch y col., 1994) como en situaciones controladas de entrenamiento para la valoración de la velocidad en test de campo específicos de los deportes (Delecluse, Roelants, Diels, Koninckx, y Verschueren, 2005; Dickwatch y col., 1994; Zwierko y Lesiakowski, 2007).

Si bien existen publicaciones donde se utiliza el sistema láser para obtener datos, son escasos y poco concluyentes los estudios que demuestran la validez y fiabilidad del sistema para determinar la velocidad de carrera (Bezodis, Salo, y Trewartha, 2012; Dickwatch y col., 1994; Harrison y cols., 2005). Dickwatch y cols. (1994) compararon las velocidades parciales obtenidas con células fotoeléctricas y láser encontrando una diferencia de alrededor de $0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Los autores justificaron estas diferencias por las distintas partes del cuerpo que utilizaron ambos métodos para realizar sus mediciones. Las células fotoeléctricas se activaban cuando el pecho cruzaba el haz de luz; mientras que el láser tomaba como referencia la zona lumbar de la espalda.

Harrison y cols. (2005) compararon los datos obtenidos con tecnología láser y vídeo y concluyeron que el sistema de medición láser produce estimaciones de distancia válidas y fiables, pero aconsejaron el uso de técnicas óptimas de filtrado o suavizado para obtener buenos resultados.

En los anteriores estudios para comprobar la validez y fiabilidad del sistema láser, se utilizaron métodos estadísticos basados en coeficientes relativos, como el coeficiente de correlación intraclase (ICC). Los métodos basados en coeficientes absolutos se expresan en la misma magnitud que la medida de la variable facilitando la comparación entre diferentes herramientas y ayudando a interpretar la magnitud real del cambio producido por el deportista (Atkinson y Nevill, 1998). Entre estos métodos destacan el cálculo del error estándar de la media (SEM), el mínimo cambio detectable (MDC) y los límites de concordancia de Bland y Altman al 95% (LoA). El SEM es un indicador de la precisión de la medida y se expresa en las mismas unidades que la medida de la variable original lo que facilita su interpretación; a menor valor, mayor fiabilidad de la medida (Atkinson y Nevill, 1998; Weir, 2005). El SEM puede ser usado para calcular el MDC que se define como el menor cambio en la medida que realmente refleja una diferencia en el rendimiento más que un error en la medición (Weir, 2005). El LoA es un método visual para evaluar el grado de correspondencia existente entre dos mediciones mediante la representación gráfica de las diferencias frente a su media de los límites de concordancia calculados a partir del intervalo de confianza al 95% para la diferencia entre las dos mediciones (Atkinson y Nevill, 1998).

A pesar de la utilidad de los métodos estadísticos absolutos, no se ha encontrado en la literatura ningún estudio que los haya utilizado para comprobar la validez y fiabilidad de los sensores láser. El resultado de estas pruebas facilitaría a entrenadores y deportistas la interpretación de los datos de velocidad para evaluar la efectividad del proceso de entrenamiento. En consecuencia, el objetivo de este estudio fue evaluar la validez y fiabilidad de un sensor láser que forma parte del sistema BioLaserSport® para calcular la velocidad de carrera mediante estadísticos relativos y absolutos. Para ello, este estudio comprobó la validez del sistema láser en comparación con otros sistemas ampliamente utilizados como son las células fotoeléctricas y la fotogrametría, así como la fiabilidad del sistema láser intrasesión e intersesión.

Material y Métodos

Participantes

Los participantes fueron 17 varones con una edad media de 20.85 ± 1.54 años, 70.17 ± 8.00 kg de masa y 1.78 ± 0.06 m de estatura. Se requirió el uso de una camiseta corta lo más pegada al cuerpo posible, para facilitar el uso del láser y unas mallas de color negro para

digitalizar posteriormente los marcadores mediante fotogrametría. Todos los sujetos fueron deportistas activos y estudiantes universitarios de la licenciatura de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte o del grado en Ciencias del Deporte. Todos los sujetos participaron de manera voluntaria en el estudio, fueron informados del objetivo del mismo y de las pruebas que se les iba a realizar y cada uno firmó un consentimiento antes de participar en las pruebas. El estudio fue conforme a la Conferencia de Helsinki para investigación con humanos (Williams, 2008) y fue aprobado por el Comité de Ética de la Institución.

Instrumentos

Se utilizó un sensor láser tipo 1 (LDM301, Jenoptik, Germany) que se halla integrado en un Sistema de análisis cinemático en tiempo real para entrenamientos y competiciones deportivas, BioLaserSport® (patentado por Ferro y Floría, 2010 y marca registrada por Ferro, 2012). El sensor láser tiene con un rango de medida de 0.5 a 300 m en superficies naturales, exactitud de ± 0.06 m para valores de medida de 2 kHz y resolución de 0.001 m. Para la medida de las distancias de la prueba se utilizó un medidor láser Stanley TLM160i, calibrado según normas ISO, de un alcance de 0.05 m a 60 m, precisión de ± 0.0015 m y unidad mínima visualizada de 0.001 m. Los datos se registraron y trataron mediante el software DasyLab v. 10.0 (Data Acquisition System Laboratory de National Instruments) mediante una rutina DSL30 creada al efecto. Para las pruebas de validación se utilizó un sistema de filmación bidimensional compuesto por una cámara digital de alta velocidad (Exilim High Speed EX-F1, Casio), un software SkillSpector v. 1.3.2. (Video4coach, Grubbemollevej) para la digitalización de las imágenes y un sistema de referencia bidimensional de 4×2 m². Asimismo, se utilizó un sistema de cronometraje mediante foto-células de doble haz (Polifemo Light, Microgate, Italy) con unas dimensiones de $59 \times 180 \times 104$ mm², un retardo de 1 ms y con una autonomía de 18 horas. Este modelo cuenta con una amplitud óptica de 15 m. El cronómetro que se utilizó fue el modelo Racetime2 (Microgate, Italy).

Procedimientos

Las pruebas se realizaron en una pista de atletismo cubierta, sobre pavimento de tartán, durante dos días y en horario comprendido entre las 9 y 14 h. El primer día se realizaron las pruebas de validación del sistema y tres días después, una segunda prueba para analizar, junto con las anteriores, la fiabilidad del sistema. Las pruebas consistieron en realizar unas pruebas de carrera de 30 m a velocidad máxima partiendo de parados ubicando los distintos sistemas de medida como se muestra en la Figura 1. Todos los sujetos participaron en las pruebas los dos días. La calle en la que se realizaron las pruebas se delimitó a 0.70 m de anchura y 30 m de longitud dejando un amplio margen de frenado (> 20 m). El sistema láser debía impactar en la espalda del deportista a una altura de 1 m del suelo. El láser se situó detrás de la línea de salida, a 2.94 m de distancia y con 0° de inclinación, controlándose la horizontalidad del haz en la distancia total de la prueba. La calibración del sensor láser se comprobó en las distancias de 0, 10, 20 y 30 m mediante el medidor láser Stanley. La prueba iba precedida de un calentamiento estándar de 10 minutos, que incluía carrera continua, movilidad articular, estiramientos estáticos y dinámicos de los miembros inferiores y superiores y tres series de 30 m, incrementales en velocidad, hasta alcanzar una velocidad submáxima próxima al sprint. Las pruebas consistieron en realizar 3 series de 30 m a máxima velocidad con un descanso de 5 minutos entre series, los dos días que duraron las pruebas. Los participantes se organizaron en grupos de cinco para poder controlar el tiempo de descanso entre series. Cada sujeto se colocó en posición de parado y debía situar el pie delantero en la línea de salida pero dejando

el tronco detrás de ésta. Se colocaron dos postes en los extremos de dicha línea y se controló que el pecho del deportista no la sobrepasase antes del inicio de la prueba. La señal de salida fue verbal utilizando las palabras “preparado” y “cuando quieras” para dar libertad en la salida y que cada sujeto pudiesen realizar los movimientos preparatorios que considerase oportunos. Se registraron datos de posición del deportista con una frecuencia de muestreo de 2000 Hz. Mediante una rutina de cálculo DSL30, diseñada con el programa DasyLab, se filtraron los datos a una frecuencia de 3 Hz con un filtro de low-pass Butterworth de 2º orden y se calcularon valores promedio cada 10 Hz con objeto de obtener datos de posiciones y velocidades a 200 Hz. Se calcularon las velocidades máximas y medias en los tramos de 0-10 m, 10-20 m y 20-30 m y se representó gráficamente la curva de posición y velocidad en cada caso, todo ello en tiempo real. El primer día, para las pruebas de validación, se utilizó un sistema de fotogrametría bidimensional y un sistema de foto-células que registraron las mismas pruebas que el sistema láser. Para la prueba de fotogrametría se utilizó el método de Ferro (2001). La cámara de vídeo de alta velocidad se situó en un plano perpendicular a la calle, a una distancia de 8 m de su centro para obtener una filmación de 4 m de ancho por 2 m de alto entre las distancias de 23 y 27 m dentro de la recta de 30 m (Figura 1). La cámara filmó a 300 fotogramas por segundo. A cada sujeto se le pusieron dos marcadores en el lado izquierdo del cuerpo, uno en el trocánter mayor del fémur y el otro en el cuello-mentón, que se utilizaron posteriormente para la digitalización manual mediante el software de fotogrametría. Los datos de posición de los marcadores fueron tratados usando un filtro low-pass Butterworth de 4º orden con una frecuencia de corte seleccionada en función de los resultados del análisis de los residuales (Winter, 2009). Las foto-células se colocaron en las distancias de 0, 10, 20 y 30 m y a una altura de 1 m, al igual que el láser, registrando los correspondientes tiempo de paso por cada una de ellas (Figura 1). Los datos procedentes, tanto de la fotogrametría como del cronometraje con las foto-células, se analizaron utilizando una rutina de cálculo personalizada (Microsoft Excel versión 2003) que permitió obtener velocidades medias y máximas, y velocidades medias, respectivamente. El segundo día de prueba consistió en realizar tres series de 30 m a máxima velocidad con un descanso entre series de 5 minutos, siguiendo el mismo protocolo que el primer día pero registrando datos solo con el sistema láser. Los datos del primer y segundo día así como los correspondientes a las dos series válidas de cada día se utilizarían para analizar la fiabilidad intrasesión e intersesión.

Análisis de datos

Para la validación del láser tomando como criterios (1) la fotogrametría de alta velocidad y (2) el sistema de cronometraje con foto-células, se calcularon las medias y desviaciones estándar de todas las variables analizadas. El ajuste a la distribución normal y la homogeneidad de las varianzas se verificaron con los test de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. El test de la t de Student para datos emparejados se usó para detectar la presencia de una diferencia sistemática en la medida de las variables con los distintos sistemas. La relación entre los resultados de las variables estudiadas en ambos métodos fueron analizados mediante el coeficiente de correlación de Pearson así como sus intervalos de confianza al 95%. Para la reproducibilidad intrasesión e intersesión, la relación entre los resultados de las variables estudiadas entre ambos test fue analizado usando el coeficiente de correlación intraclase así como sus intervalos de confianza al 95%. El error estándar de la media (SEM) fue calculado como $(SD)(1-ICC)^{1/2}$, donde SD fue la desviación estándar del test con mayor desviación estándar y ICC fue el coeficiente de correlación intraclase entre los

dos test. SEM fue expresado como porcentaje sobre el valor medio de la variable para facilitar la interpretación del error de medida. El mínimo cambio detectable se calculó como $\sqrt{2} \times 1.96 \times \text{SEM}$. El MDC expresado como porcentaje sobre el valor medio de la variable facilita la interpretación del valor absoluto de MDC y proporciona información sobre la sensibilidad del sistema láser para detectar cambios en la ejecución. El nivel de significación estadística para todos los análisis fue establecida en $P \leq 0.05$. Todos los cálculos fueron realizados con el software SPSS 18.0.

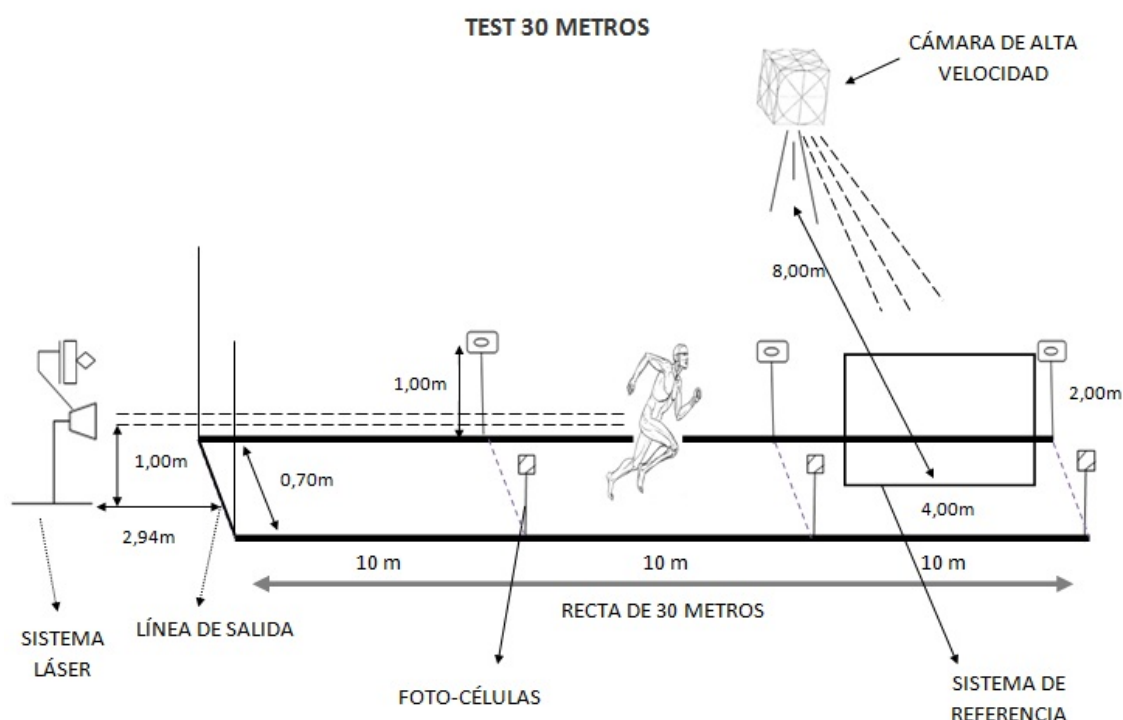


Figura 1. Disposición de los sistemas láser, fotogrametría y cronometraje con foto-células en la zona de carrera.

Resultados

En la tabla 1 se presentan los datos de validez del sistema láser tomando como criterio el sistema de cronometraje con foto-células para la variable velocidad media en los tres tramos de 0-10 m, 10-20 m y 20-30 m del test de 30 m. Se observan diferencias significativas de $-0.29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ solo en el primer tramo pero con un coeficiente de correlación alto de 0.925.

Tabla 1. Validez del sistema láser vs. sistema de cronometraje con foto-células para las velocidades medias.

Variable	Fotocélula	Láser	Diferencias	Correlación (95% IC)	LoA
V0-10 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5.25 ± 0.21	$5.54 \pm 0.22^*$	-0.29	0.925 (0.869 – 0.957)	-0.46 a -0.13
V10-20 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	7.92 ± 0.28	7.96 ± 0.27	-0.03	0.973 (0.953 – 0.985)	-0.16 a 0.09
V20-30 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	8.50 ± 0.35	8.49 ± 0.34	0.01	0.989 (0.966 – 0.989)	-0.12 a 0.14

IC: Intervalo de confianza. LoA: límites de concordancia. $^*P < 0.05$

En la figura 2, se presenta la gráfica de Bland-Altman para la velocidad media en el tramo 0-10 m con objeto de valorar la concordancia entre el sistema láser y el sistema de foto-células.

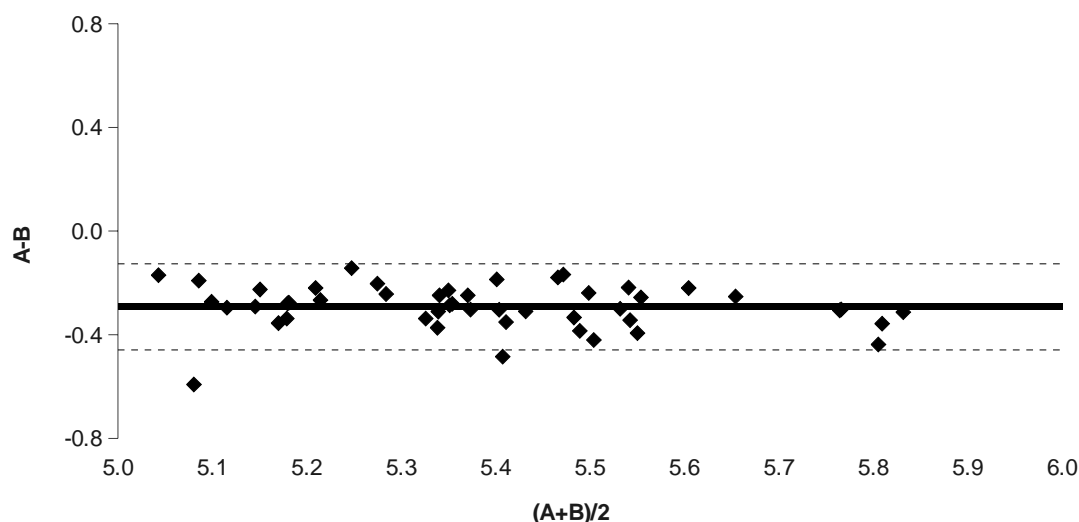


Figura 2. Gráfica representativa de Bland-Altman para la velocidad media del intervalo 0 – 10 m medido con el sistema de foto-células (A) y sistema láser (B). La línea central continua representa la media de la diferencia entre los dos sistemas y las líneas discontinuas representan 2 desviaciones estándar de la media.

En la tabla 2 se presentan los datos de validez del sistema láser tomando como criterio el sistema de fotogrametría para las variables velocidad media y velocidad máxima en el tramo 23-27 m del test de 30 m, observándose una alta correlación en ambas variables.

Tabla 2. Validez del sistema láser vs. sistema de fotogrametría para las velocidades medias y máximas.

Variable	Fotogrametría	Láser	Diferencias	Correlación (95% IC)	LoA
Vmedia ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	8.45 ± 0.30	$8.56 \pm 0.30^*$	-0.11	0.961 (0.897 – 0.986)	-0.27 a -0.06
Vmax ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	8.95 ± 0.36	$8.81 \pm 0.34^*$	0.14	0.869 (0.677 – 0.950)	-0.21 a 0.49

IC: Intervalo de confianza. LoA: límites de concordancia. $*P < 0.05$

En la figura 3 y 4, se representan las gráficas Bland-Altman para valorar la concordancia de los dos sistemas para las variables velocidad media y velocidad máxima, respectivamente.

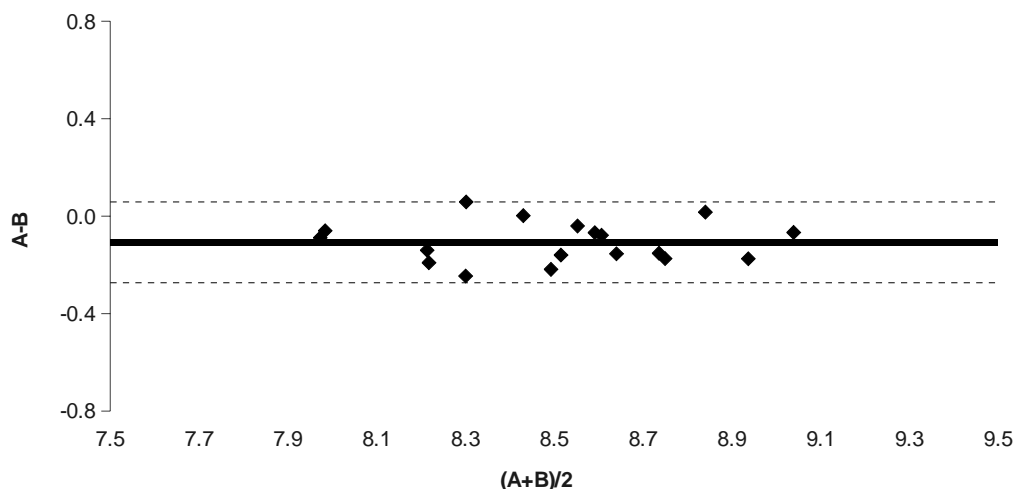


Figura 3. Gráfica representativa de Bland-Altman para la velocidad media medida mediante el sistema de fotogrametría (A) y el sistema láser (B). La línea central continua representa la media de la diferencia entre los dos sistemas y las líneas discontinuas representan 2 desviaciones estándar de la media.

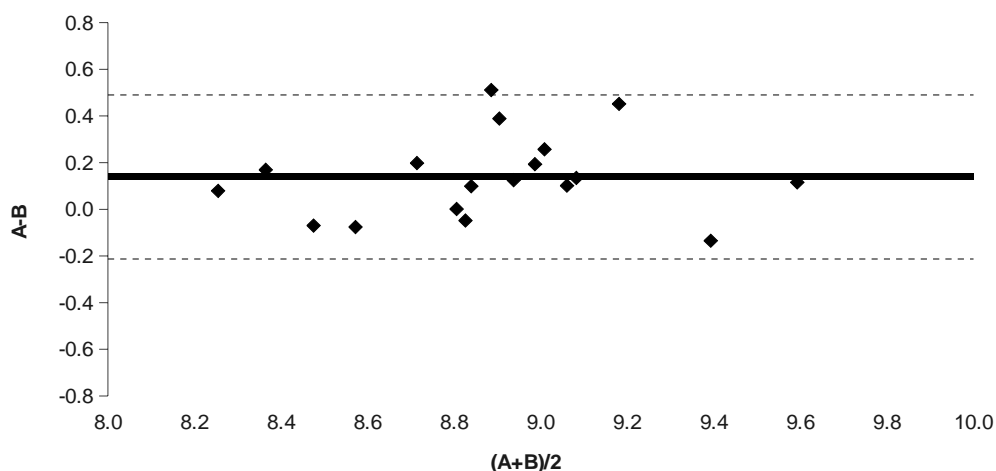


Figura 4. Gráfica representativa de Bland-Altman para la velocidad máxima medida mediante el sistema de fotogrametría (A) y sistema láser (B). La línea central continua representa la media de la diferencia entre los dos sistemas y las líneas discontinuas representan 2 desviaciones estándar de la media.

En las tablas 3 y 4 se presentan los datos estadísticos que permiten la valoración de la fiabilidad intrasesión correspondiente a las velocidades medias y velocidades máximas obtenidas en el test de 30 metros. No se observaron diferencias significativas entre series, los coeficientes de correlación fueron altos y los valores mínimos que permitirían indicar que se ha producido una mejora en la velocidad media deberían situarse por encima de $0.12\text{-}0.14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en las velocidades medias y de $0.21\text{-}0.29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en las máximas. En ambos casos, para valorar un cambio en la velocidad intrasesión los valores obtenidos en la pruebas que se realicen deberían ser superiores al 2.09% en las velocidades medias y de 3.76% en las máximas.

Tabla 3. Fiabilidad obtenida para las velocidades medias intrasesión

Variable	Test 1	Test 2	Diferencias	ICC (95% IC)	LoA	CR	SEM	SEM (%)	MDC	MDC (%)
V0-10 m·s ⁻¹	5.51 ± 0.16	5.53 ± 0.17	0.03 ± 0.06	0.940(0.86-0.98)	-0.09 a 0.14	0.23	0.04	0.75	0.12	2.09
V10-20 m·s ⁻¹	8.04 ± 0.21	8.04 ± 0.19	0.00 ± 0.07	0.941(0.86-0.98)	-0.14 a 0.15	0.02	0.05	0.65	0.14	1.79
V20-30 m·s ⁻¹	8.60 ± 0.23	8.58 ± 0.23	-0.02 ± 0.07	0.956(0.90-0.98)	-0.16 a 0.12	0.20	0.05	0.57	0.14	1.59

ICC: Coeficiente de correlación intraclase. IC: Intervalo de confianza. LoA: Límites de concordancia. CR: Coeficiente de repetibilidad. SEM: Error estándar de la media. MDC: Mínimo cambio detectable. * $p < 0.05$

Tabla 4. Fiabilidad obtenida para las velocidades máximas intrasesión

Variable	Test 1	Test 2	Diferencias	ICC (95% IC)	LoA	CR	SEM	SEM (%)	MDC	MDC (%)
Vmax0-10 m·s ⁻¹	7.57±0.24	7.55±0.25	-0.02±0.15	0.836(0.64-0.93)	-0.31 a 0.27	0.17	0.10	1.36	0.28	3.76
Vmax10-20 m·s ⁻¹	8.61±0.23	8.58±0.21	-0.03±0.11	0.892 (0.75-0.95)	-0.24 a 0.18	0.30	0.08	0.90	0.21	2.49
Vmax20-30 m·s ⁻¹	8.92±0.27	8.9±0.29	0.00±0.15	0.870(0.71-0.95)	-0.30 a 0.29	0.04	0.10	1.17	0.29	3.23

ICC: Coeficiente de correlación intraclase. IC: Intervalo de confianza. LoA: Límites de concordancia. CR: Coeficiente de repetibilidad. SEM: Error Estándar de la media. MDC: Mínimo cambio detectable. * $p < 0.05$

En las Tablas 5 y 6 se presentan los datos estadísticos que permiten la valoración de la fiabilidad intersección correspondiente a las velocidades medias y velocidades máximas obtenidas en el test de 30 metros. Se observaron diferencias significativas entre series en el tramo 10-20 m, aunque los coeficientes de correlación fueron los más altos (0.88 y 0.85, respectivamente). Los valores mínimos que permitirían indicar que se ha producido una mejora en la velocidad media deberían situarse por encima de 0.34 m·s⁻¹ en las velocidades medias y 0.47 m·s⁻¹ en las máximas. En ambos casos, para valorar un cambio en la velocidad los valores obtenidos en la pruebas que se realicen deberían ser superiores al 5.56% en las velocidades medias y de 5.25% en las máximas.

Tabla 5. Fiabilidad obtenida para las velocidades medias intersección

Variable	Test 1	Test 2	Diferencias	ICC (95% IC)	LoA	CR	SEM	SEM (%)	MDC	MDC (%)
V0-10 m·s ⁻¹	5.53 ± 0.16	5.56±0.23	0.03±0.14	0.764(0.46-0.91)	-0.25 a 0.32	0.29	0.11	2.00	0.31	5.56
V10-20 m·s ⁻¹	8.04 ± 0.21	7.98±0.21*	-0.06 ±0.11	0.880(0.70-0.95)	-0.28 a 0.16	0.50	0.07	0.93	0.21	2.57
V20-30 m·s ⁻¹	8.59 ± 0.23	8.51±0.30	-0.08±0.16	0.837(0.61-0.94)	-0.40 a 0.24	0.65	0.12	1.42	0.34	3.93

ICC: Coeficiente de correlación intraclase. IC: Intervalo de confianza. LoA: Límites de concordancia. CR: Coeficiente de repetibilidad. SEM: Error Estándar de la media. MDC: Mínimo cambio detectable. * $p < 0.05$

Tabla 6. Fiabilidad obtenida para las velocidades máximas intersesión

Variable	Test 1	Test 2	Diferencias	ICC (95% IC)	LoA	CR	SEM	SEM (%)	MDC	MDC (%)
Vmax0-10 m·s ⁻¹	7.55±0.24	7.47±0.36	-0.08±0.19	0.727(0.39-0.89)	-0.46 a 0.30	0.67	0.14	1.81	0.38	5.01
Vmax10-20 m·s ⁻¹	8.58±0.21	8.47±0.26*	-0.11±0.14	0.853(0.64-0.94)	-0.38 a 0.15	0.96	0.10	1.17	0.28	3.25
Vmax20-30 m·s ⁻¹	8.88±0.22	8.85±0.32	-0.03±0.21	0.721(0.38-0.89)	-0.45 a 0.40	0.22	0.17	1.89	0.47	5.25

ICC: Coeficiente de correlación intraclass. IC: Intervalo de confianza. LoA: Límites de concordancia. CR: Coeficiente de repetibilidad. SEM: Error Estándar de la media. MDC: Mínimo cambio detectable. * $p < 0.05$

Discusión

En el estudio se analizó la validez y fiabilidad del sistema láser para valorar la velocidad en un test de 30 m. Aunque los resultados fueron aceptables en todos los tramos estudiados, el grado de validez y fiabilidad varió entre tramos. En líneas generales en el primer tramo, en el cuál el atleta partía desde parado, el grado de validez y fiabilidad fue menor que en los otros dos tramos en los cuales el atleta lo iniciaba con una cierta velocidad. Estos resultados están en consonancia con los aportados por Bezodis y col. (2012) en el que los autores observaron que el error entre la velocidad del centro de masas obtenida mediante fotogrametría, digitalizando las imágenes y calculando el CDG del deportista, y la velocidad registrada por el láser apuntado a la zona lumbar disminuía a medida que la distancia a medir se alejaba de la salida del test. Los autores atribuyeron este error a los cambios en la posición del atleta durante los primeros metros de la prueba. En dicho estudio los atletas realizaron una salida de tacos por lo que en los primeros metros la posición del centro de masas y la posición del punto lumbar no coincidieron resultando así diferencias en la velocidad entre ambas mediciones. En el presente estudio, con objeto de obtener un registro estable durante todo el test se controló que la posición de salida fuese de pie. Aún así, esto no evitó que las diferencias entre las velocidades medias registradas por las foto-células y el láser fueron mayores en el primer tramo (0-10 m) que en los dos restantes tramos (10-20 y 20-30 m). Estas diferencias podrían ser explicadas, tanto por las diferentes partes corporales utilizadas por ambos sistemas como referencia para el cálculo de la velocidad, como por la diferencia entre la posición del atleta en la salida y al paso por los respectivos 10, 20 y 30 m. El sistema de foto-células permite calcular la velocidad media a partir del tiempo que transcurre entre el corte de dos haces separados por una distancia dada. Consecuentemente, el corte del haz fue provocado por la parte anterior del cuerpo. En cambio el sistema láser apuntó al atleta en la zona lumbar con lo que la referencia para el cálculo de la velocidad media fue distinta. Esta no coincidencia en la referencia corporal se mantuvo durante toda la prueba por lo que podría explicar diferencias entre sistemas en todos los tramos. Sin embargo, el hecho de que solo existan diferencias en el primer tramo puede deberse a que aunque se controló que la posición de salida fuese de pie, esto no evitó que se produjese una ligera inclinación del cuerpo del atleta para permitir la aceleración en los primeros apoyos. A medida que la carrera progresó el atleta podría haber ido adoptando una posición más erguida que se mantendría durante el resto del test. Las diferencias entre foto-células y láser en el resto de tramos (10-20 m y 20-30 m) fueron muy pequeñas y con coeficientes de correlación elevados, mayores de 0.9 en cualquiera de los casos. Estos resultados están en consonancia con los encontrados en la

bibliografía (Bezodis y col., 2012; Dickwatch y col., 1994; Harrison y col., 2005) que valoran el sistema láser como una herramienta potencialmente válida para estimar la velocidad más allá de los 10 m durante un sprint.

En el presente estudio la validación fue completada con la comparación de los datos obtenidos mediante el sistema láser y la fotogrametría mediante la digitalización manual del sujeto en el tramo 23-27 m. Los resultados mostraron menores diferencias entre ambos sistemas en la velocidad media que en la velocidad máxima alcanzada por el atleta en ese tramo, sin embargo estas fueron pequeñas y con errores aceptables. Aunque el láser registró velocidades medias mayores a las obtenidos mediante fotogrametría, los errores medio y aleatorio fueron razonables ($-0.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $0.21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente) (Tabla 2 y Figuras 3 y 4) y el coeficiente de correlación alto, superior a 0.9. Estos errores están en consonancia con los reportados en la bibliografía (Bezodis y col., 2012; Dickwatch y col., 1994; Harrison y col., 2005) y se consideran aceptables para el cálculo de la velocidad media en carrera. Asimismo, los valores de velocidad máxima registrados por el sistema láser fueron inferiores a los obtenidos mediante fotogrametría, y los errores medio y aleatorio fueron de $0.14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $0.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. Del mismo modo, el coeficiente de correlación fue alto (0.869; 95% IC: 0.677 – 0.950). De los dos marcadores digitalizados en el estudio, troncánter mayor del fémur y cuello-mentón, el que obtuvo mejores correlaciones fue el primero y es el que se ha presentado en el estudio. Este resultado parece lógico puesto que existió una gran coincidencia en la altura en la que impactó el haz y la del marcador digitalizado dado que la altura de la muestra fue muy similar ($1.76 \pm 0.06 \text{ m}$). No se ha encontrado ningún estudio en la bibliografía que valide la velocidad máxima obtenida mediante sistema láser con el que poder comparar los resultados de este estudio. La importancia de la velocidad máxima para el rendimiento está contrastada por su relación con la potencia máxima y la capacidad de acelerar del atleta (Di Prampero y col., 2005; Ferretti, Bringard, y Perini, 2011) por lo que no se descarta la necesidad de diseñar nuevos procedimientos que permitan mejorar la estabilidad de la zona de contacto del deportista con el haz para asegurar la validez de la velocidad máxima durante el sprint. Con el objetivo de facilitar a entrenadores y atletas la interpretación de los datos de velocidad registrados por el sistema láser, en el presente estudio se calcularon variables relativas y absolutas de la fiabilidad del sistema intrasesión e intersección. En líneas generales el sistema láser mostró una excelente fiabilidad test-retest en las variables estudiadas al obtener valores del ICC superiores a 0.7 llegando incluso en algunas variables a superar el valor de 0.9. Los resultados mostraron que la fiabilidad relativa fue mayor en las velocidades medias de cada tramo que en las velocidades máximas. Del mismo modo, los valores obtenidos de fiabilidad relativa fueron mayores en la intrasesión que en la intersección. Estos resultados fueron consecuentes con el estudio de Bezodis y col. (2012) en cuál los autores indicaron que la variabilidad individual intersección fue mayor que la intrasesión. Para conocer en que medida los valores del ICC influyen en la interpretación de los datos fue necesario calcular variables absolutas que valoren la fiabilidad del sistema láser. Para todas las variables estudiadas, velocidad medias y máximas en las pruebas intrasesión, el valor de SEM fue bajo, entre 0.04 y $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, siendo el SEM% sistemáticamente bajo en todos los casos y menor al 1.36% de la medida. Estos valores aceptables de fiabilidad absoluta sugieren el uso del sistema láser como una herramienta fiable para medir el rendimiento de la velocidad en deportistas. Los valores del MDC revelaron que fue necesaria una variación entre 0.12 y $0.14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en la velocidad media, dependiendo del tramo, para detectar un cambio significativo en el rendimiento del deportista en esta variables. Estos valores fueron, en cualquier caso, menores al 2.09% de la velocidad

medida por lo que se sugiere que el sistema láser fue capaz de identificar pequeños cambios en esta variable. Los valores del MDC obtenidos para la velocidad máxima estuvieron comprendidos entre 0.21 y 0.29 m·s⁻¹ indicando que un cambio en la velocidad máxima debería exceder estos valores para ser considerado un cambio real. Aunque estos valores fueron mayores a los registrados para la velocidad media, el MDC% fue menor al 3.76%, en cualquier caso, sugiriendo de nuevo la utilidad del sistema láser para evaluar los cambios en la velocidad máxima del deportista. En las pruebas intersesión, los valores del SEM fueron menores del 0.17 m·s⁻¹ en ambas variables y, en todo caso, menores del 2%. Los valores del MDC fueron menores de 0.34 m·s⁻¹ en las velocidades medias y 0.47 m·s⁻¹ en las máximas, con valores relativos menores a 5,56% y 5.25% si consideramos todos los tramos en su conjunto. Estos resultados podrían verse afectados por las variaciones de la condición física de los deportistas el día de la prueba más que por la precisión del sistema láser.

Con relación a los tramos específicos en los que se dividió la prueba, los valores más altos de SEM y MDC se encontraron en el primer tramo (0-10 m). Estos resultados están en consonancia con los encontrados en las pruebas de validación del presente estudio, en las que se observó que el primer tramo fue en que se obtuvo mayor error posiblemente debido a la diferente posición del cuerpo del deportista al inicio y final del tramo. Esto podría también explicar la menor fiabilidad de este tramo con respecto a los dos siguientes. Del igual modo a lo observado en las pruebas de validación y fiabilidad relativa, los valores de fiabilidad absoluta fueron menores en las pruebas intrasesión que en las pruebas intersesión, aunque la diferencia fue pequeña. Estos resultados sugieren que el sistema láser puede ser una herramienta fiable y, por tanto, útil para comparar deportistas entre sí, así como valorar el progreso del entrenamiento a través de diferentes sesiones o a lo largo de la temporada.

Conclusiones

El sensor láser del sistema BioLaserSport® es válido para el cálculo de las velocidades medias y máximas en la carrera de velocidad dado que proporciona diferencias de -0,11 m·s⁻¹ y 0.14 m·s⁻¹, respectivamente, con unos coeficientes de correlación altos con relación a la fotogrametría así como, con relación a las velocidades medias, con el cronometraje con fotocélulas. Se debe prestar especial atención en las posiciones que adopta el deportista en los primeros 10 m de la carrera, puesto que el haz pudiera contactar en distintas zonas del cuerpo y ofrecer una medida menos estable. El sistema es fiable dado que permite la valoración de las velocidades medias y máximas intrasesión con un error menor de 0.05 m·s⁻¹ y 0.10 m·s⁻¹, respectivamente, y menor de 0.75% y 1.36%, respectivamente. Además, fue capaz de detectar cambios menores a 0.14 m·s⁻¹ y 0.29 m·s⁻¹, respectivamente, y menores de 2.09% y 3.76%, respectivamente. Asimismo, la fiabilidad intersesión fue buena con valores del SEM para ambas variables menor de 0.17 m·s⁻¹ y menor del 2%, apreciándose un cambio mínimo para velocidades medias menor de 0.34 m·s⁻¹ y para las máximas menor de 0.47 m·s⁻¹, lo que representa un valor menor del 5.56% si se considera el conjunto de las variables. En consecuencia, el sensor láser es un instrumento útil para el análisis de la velocidad de carrera de 0 a 30 m, proporciona resultados en tiempo real y puede ser utilizado para la valoración de las velocidades máximas y medias de los deportistas así como para realizar un seguimiento de la evolución de su velocidad. Sin embargo, se han de tener en cuenta los márgenes de error indicados y los valores mínimos a partir de los cuales las diferencias que se encuentren deban ser atribuibles a un cambio en el rendimiento y no a un error en la medida. En este sentido, se han de considerar los límites de los SEM, SEM%, MDC y MDC% para valorar la mejora del rendimiento.

Agradecimientos

A Juan Carlos Álvarez Ortiz, entrenador de la Real Federación Española de Atletismo, por su colaboración en este estudio, al Consejo Superior de Deportes por su apoyo y al Ministerio de Economía y Competitividad por la financiación del proyecto del Plan Nacional I+D+i, DPS2008-06499.

Referencias

- Adamezewski, H., & Perlt, B. (1997). Run-up velocities of female and male pole vaulting and some technical aspects of women's pole vault. *New Studies in Athletics*, 1, 63-76.
- Atkinson, G., & Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine*, 26(4), 217-238.
- Bezodis, N. E.; Salo, A. I. T., & Trewartha, G. (2012). Measurement error in estimates of sprint velocity from a laser displacement measurement device. *International Journal of Sports Medicine*, 33(6), 439-444.
- Brüggemann, G. -, & Glad, B. (1990). *Time analysis of the sprint events*. Monaco: International Athletic Foundation.
- Brüggemann, G. -.; Koszewski, D., & Müller, H. (1999). *Biomechanical Research Project, Athens 1997. Final Report*. Aachen: Meyer y Meyer Sport.
- Coutts, A. J., & Duffield, R. (2010). Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(1), 133-135.
- Delecluse, C.; Roelants, M.; Diels, R.; Koninckx, E., & Verschueren, S. (2005). Effects of whole body vibration training on muscle strength and sprint performance in sprint-trained athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 26(8), 662-668.
- Di Prampero, P. E.; Fusi, S.; Sepulcri, L.; Morin, J. B.; Belli, A., & Antonutto, G. (2005). Sprint running: A new energetic approach. *Journal of Experimental Biology*, 208(14), 2809-2816.
- Dickwatch, H.; Hildebrand, F., & Perlt, B. (1994). A laser velocity measuring device. the determination of velocity courses in the jumping events with the use of the LAVEG measuring device. *New Studies Athletics*, 9(4), 31-40.
- Ferretti, G.; Bringard, A., & Perini, R. (2011). An analysis of performance in human locomotion. *European Journal of Applied Physiology*, 111(3), 391-401.
- Ferro, A. (2001). *La carrera de velocidad. Metodología de análisis biomecánico*. Madrid: Librerías Deportivas Esteban
- Ferro, A. (2012). *Biolasersport*. Marca Nacional nº3019808/9. Boletín Oficial de la Propiedad Industrial (B.O.P.I.). Fecha de Publicación: 12.06.2012.
- Ferro, A., y Floría, P. (2010). *Sistema de análisis cinemático en tiempo real para entrenamientos y competiciones deportivas*. Universidad de Politécnica de Madrid y Universidad Pablo Olavide, Sevilla. España, ES2331170A1 (A61B 5/11-G01S 11/00) Patente nº 2009000134. Presentación Solicitud: 19.01.2009 Publicación BOPI: 22.12.2009.

- Ferro, A.; Rivera, A.; Pagola, I.; Ferreruella, M., & Rocandio, V. (2001). Biomechanical analysis of the 7th world championships in athletics seville 1999. *New Studies in Athletics*, 16(1/2), 25-60.
- Floría, P., y Ferro, A. (2011). Análisis del rendimiento en competición entre corredores de 100 metros lisos de diferente nivel. *RICYDE. Revista Internacional de Ciencias del Deporte*, 7(26), 408-416.
- Graubner, R., & Nixdorf, E. (2011). Biomechanical analysis of the sprint and hurdles events at the 2009 IAAF world championships in athletics. *New Studies in Athletics*, 26(1/2)
- Harrison, A. J.; Jensen, R. L., & Donoghue, O. (2005). A comparison of laser and video techniques for determining displacement and velocity during running. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 9(4), 219-231.
- Hill, A. V. (1928). The air resistance to a runner. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 102, 380-385.
- Landry, D. (1987). Roma 87. the IInd world championship in athletics provide a basis for comparison. *New Studies in Athletics*, 2(3), 29-47.
- Locatelli, E., & Arsac, L. (1995). The mechanics and energetics of the 100m sprint. *New Studies in Athletics*, 10(1), 81-87.
- Moravec, P.; Ruzicka, J.; Susanka, P.; Dostal, E.; Kodejs, M., & Nosek, M. (1988). IAAF scientific project report: Time analysis of the 100 metres events at the II World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*, 3(3), 61-96.
- Susanka, P.; Moravec, P.; Dostal, E.; Ruzicka, J.; Barac, F.; Vezlak, J.; Nosek, M. & Jardik, M. (1989). *Report of the IMF Research Project at the XXXIV Olympiad Seoul*. London: IAAF Publication.
- Varley, M. C.; Fairweather, I. H., & Aughey, R. J. (2012). Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration, deceleration, and constant motion. *Journal of Sports Sciences*, 30(2), 121-127.
- Weir, J. P. (2005). Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(1), 231-240.
- Williams, J. R. (2008). The declaration of helsinki and public health. *Bulletin of the World Health Organization*, 86(8), 650-652.
- Winter, D. A. (Ed.). (2009). *Biomechanics and motor control of human movement* (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Yeadon, M. R.; Kato, T., & Kerwin, D. G. (1999). Measuring running speed using photocells. *Journal of Sports Sciences*, 17(3), 249-257.
- Young, W.; Farrow, D.; Pyne, D.; McGregor, W., & Handke, T. (2011). Validity and reliability of agility tests in junior australian football players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(12), 3399-3403.
- Zwierko, T., & Lesiakowski, P. (2007). Selected parameters of speed performance of basketball players with different sport experience levels. *Studies in Physical Culture and Tourism*, 14, 307-312.